



TUGAS AKHIR - SF 141501

**PENGEMBANGAN INVERSI GELOMBANG RAYLEIGH
PADA *GIBSON HALF-SPACE* BERBASIS *LEVENBERG-
MARQUARDT (L-M)* DAN *SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION (SVD)***

**ROHMATUL AMINAH
NRP 1111 100 078**

**Dosen Pembimbing
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Sungkono, M.Si**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015**



FINAL PROJECT - SF 141501

**DEVELOPMENT OF INVERTING RAYLEIGH-WAVE IN
GIBSON HALF-SPACE BASED ON LEVENBERG-
MARQUARDT (L-M) AND SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION (SVD)**

**ROHMATUL AMINAH
NRP 1111 100 078**

**Advisor
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Sungkono, M.Si**

**PHYSICS DEPARTMENT
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2015**

LEMBAR PENGESAHAN

PENGEMBANGAN INVERSI GELOMBANG RAYLEIGH PADA *GIBSON HALF-SPACE* BERBASIS *LEVENBERG- MARQUARDT (LM)* DAN *SINGULAR VALUE DECOMPOSITION (SVD)*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Fisika Bumi
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun oleh :

ROHMATUL AMINAH

NRP. 1111 100 078

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

Prof.Dr.rer.nat. Bagus W. Santosa, S.Pd.

Sungkono, M.Si



**SURABAYA
JULI, 2015**

**PENGEMBANGAN INVERSI GELOMBANG RAYLEIGH
PADA *GIBSON HALF – SPACE* BERBASIS *LEVENBERG –
MARQUARDT (L-M)* DAN *SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION (SVD)***

Nama Mahasiswa : Rohmatul Aminah
NRP : 1111 100 078
Jurusan : Fisika FMIPA-ITS
**Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU
Sungkono, M.Si**

Abstrak

Inversi merupakan salah satu cara untuk mengetahui nilai parameter struktur bawah permukaan bumi. Penelitian ini membahas aplikasi metode Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) untuk menentukan kecepatan gelombang geser (V_s) vertikal bawah permukaan. Gelombang SV pada pemodelan bumi tak-berlapis (Gibson Half-Space) dapat diprediksikan dengan menginversikan kecepatan fase gelombang Rayleigh. Analisis hukum dispersi gelombang Rayleigh dinyatakan dengan formulasi aljabar yang dapat menghasilkan proses inversi yang sederhana dan cepat. Metode inversi yang digunakan adalah metode Levenberg-Marquardt (L-M) dan Singular Value Decomposition (SVD). Keuntungan dari metode algoritma ini adalah hanya membutuhkan tiga parameter, yaitu m (ukuran ketidaksamaan yang berdimensi inversi panjang), v_{s0} (kecepatan gelombang S pada permukaan), dan ν (nilai Poisson's ratio) untuk menentukan pemodelan Gibson Half-space. Metode ini dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya V_s sebagai fungsi kedalaman dengan akurat menggunakan data kecepatan fase gelombang Rayleigh pada frekuensi yang terbatas atau frekuensi tertentu. Hasil inversi data lapangan menunjukkan bahwa hasil pemodelan inversi sesuai dengan keadaan geologi LUSI dengan nilai rms error yang rendah untuk masing-masing metode.

Sehingga, kedua metode inversi ini sangat akurat, sederhana, dan cepat untuk diaplikasikan pada analisis konstruksi, seperti tanggul.

Kata Kunci: *gelombang Rayleigh, Gibson Half-space, inversi, kecepatan gelombang geser, dan kurva dispersi*

DEVELOPMENT OF INVERTING RAYLEIGH WAVE IN A GIBSON HALF-SPACE BASED ON LEVENBERG- MARQUARDT (L-M) AND SINGULAR VALUE DECOMPOSITION (SVD)

Name : Rohmatul Aminah
Student Identity : 1111 100 078
Department : Physics FMIPA-ITS
Advisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU
Sungkono, M.Si

Abstract

Inversion is one of methods to obtain surface parameters. This research discussed about the application of Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) method to determine shear-wave velocity (V_s) vertical profile in subsurface. The shear-wave velocity in a Gibson Half-space model was estimated by inverting Rayleigh-wave phase velocities. An analytical dispersion law of Rayleigh-wave is given in an algebraic form, which makes the inversion process extremely simple and fast. The inversion methods used are Levenberg-Marquardt (L-M) method and Singular Value Decomposition (SVD) techniques. The advantage of this algorithm is only three parameters define the Gibson Half-space model, such as m (measure of inhomogeneity which has the dimensions of inverse length), v_{s0} (S-wave velocity at the surface), and ν (Poisson's ratio). This method is useful to estimate accurate shear-wave velocity at the depth using Rayleigh-wave phase velocity in a limited frequency range or at certain frequencies. Inversion results showed that this model fit to the shallow geology of LUSI with low rms error for both methods, so they are accurate, simple and fast to be applied in construction analysis, such as dams.

Keywords: *dispersion curve, Gibson Half-space, inversion, Rayleigh-wave, and shear-wave velocity*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirrabbi ‘alamiin, Puji Syukur penulis ucapkan hanya kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rizqi dan rahmat-Nya selama penulis menjalani perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, sehingga penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

PENGEMBANGAN INVERSI GELOMBANG RAYLEIGH PADA *GIBSON HALF-SPACE* BERBASIS *LEVENBERG – MARQUARDT (LM)* DAN *SINGULAR VALUE DECOMPOSITION (SVD)*

Dengan terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunannya terutama kepada:

1. Kedua orangtua penulis, Ayahanda Warji dan Ibunda Anik yang telah memberikan banyak doa, dukungan dan semangat yang tiada henti serta dukungan dari keluarga, adik-adikku, Rofiq, Achmady, Tutus, Hamdi, Bayu, Haki, dan Nazwa.
2. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU dan Mas Sungkono, M.Si yang dengan sabar membimbing penulis mulai awal pengerjaan dan penulisan tugas akhir hingga selesai.
3. Bapak Dr. Mashuri selaku dosen wali.
4. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng. dan Ibu Dr. Melania Suweni M., M.T., selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA ITS.
5. Seluruh Staf Pengajar dan TU di Jurusan Fisika ITS
6. Sahabat-sahabat penulis: Ega, Zainal, Yudha, Mas Riski, Mas Tri, dan sahabat P’sart: Yenny, Mbak Rohmah, & Izza atas semua dukungan dan bantuannya selama ini.
7. Teman-teman Lab. Geo Lantai 4: Dharma, Jordan, Asdi, Bagus, Wisnu, Mas Arya, dan Aris serta Pak Kis selaku

Laboran Geofisika.

8. Serta teman-teman Foton 2011 yang selalu berbagi semangat dan perhatian selama berkuliah hingga sekarang penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari akan keterbatasannya, berharap kritik dan saran yang membangun. Semoga dengan adanya Tugas Akhir ini dapat menginspirasi pembaca dan menyumbangkan ilmu khususnya dalam bidang Fisika Bumi (Geofisika).

Surabaya, Juli 2015

Rohmatul Aminah

DAFTAR ISI

Bab	Halaman
Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
Abstract	vi
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xiv
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Gelombang Rayleigh	5
2.2 Inversi Gelombang Rayleigh	6
2.3 <i>Multichannel Analysis of Surface Wave</i> (MASW)	8
2.4 Metode Inversi pada <i>Gibson Half – Space</i>	9
 BAB III METODOLOGI	 15
3.1 Diagram Alir Penelitian	15
 BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	 19
4.1 Pemodelan ke Depan <i>Gibson Half-space</i>	19
4.2 Inversi Kurva Dispersi pada Data Sintetik	20
4.2.1 Kurva Dispersi dengan Frekuensi 10-100 Hz	20
4.2.2 Kurva Dispersi dengan Frekuensi 5-40 Hz	30

4.3 Pengujian Kurva Dispersi untuk Data Lapangan	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	49
BIODATA PENULIS	53

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perbandingan nilai rms <i>error</i> kurva dispersi gelombang Rayleigh	39
Tabel 4.2	Perbandingan nilai rms <i>error</i> gelombang geser (V_s) sebagai fungsi kedalaman	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan partikel gelombang Rayleigh	5
Gambar 2.2	Pola gerakan partikel gelombang Rayleigh	6
Gambar 2.3	Inversi gelombang Rayleigh	8
Gambar 2.4	Skema pengukuran dan perekaman data lapangan	9
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	15
Gambar 4.1	Kurva dispersi gelombang Rayleigh sebagai fungsi frekuensi	19
Gambar 4.2	Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi: (a) metode L-M (b) metode SVD	22
Gambar 4.3	Perbandingan RMS <i>error</i> dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD	23
Gambar 4.4	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD	25
Gambar 4.5	Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi dengan <i>noise</i> : (a) metode L-M (b) metode SVD	26
Gambar 4.6	Perbandingan RMS <i>error</i> dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD	28
Gambar 4.7	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD	29
Gambar 4.8	Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi: (a) metode L-M (b) metode SVD	31
Gambar 4.9	Perbandingan RMS <i>error</i> dengan iterasi: (a)	32

	metode L-M (b) metode SVD	
Gambar 4.10	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD	34
Gambar 4.11	Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi dengan <i>noise</i> : (a) metode L-M (b) metode SVD	35
Gambar 4.12	Perbandingan RMS <i>error</i> dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD	37
Gambar 4.13	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD	38
Gambar 4.14	Data gelombang Rayleigh hasil analisis data MASW	40
Gambar 4.15	Data gelombang Rayleigh hasil <i>picking</i> analisis data MASW	41
Gambar 4.16	Perbandingan data observasi dan inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh sebagai fungsi frekuensi pada data lapangan: (a) metode L-M (b) metode SVD	42
Gambar 4.17	Perbandingan RMS <i>error</i> sebagai fungsi iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD	43
Gambar 4.18	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman kedua metode	44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Metode seismik merupakan salah satu metode yang penting dan banyak digunakan dalam mempelajari karakteristik bawah permukaan yang memiliki ketepatan dan resolusi yang tinggi untuk memodelkan struktur geologi bawah permukaan bumi (Telford, 1976). Dalam menentukan stuktur geologi, metode seismik dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *invasive tests* and *non-invasive tests*. Metode *invasive tests* memerlukan suatu lubang bor (*cross-hole*, *down hole*, *P-S suspension logging*), sedangkan metode *non-invasive* dilakukan di permukaan tanah (pemantulan, pembiasan, dan analisis gelombang permukaan).

Pada penelitian ini kita akan menggunakan salah satu jenis metode *non-invasive*, yaitu *Multichannel Analysis of Surface Wave* (MASW). Metode ini merupakan metode pengujian lapangan yang tidak merusak lingkungan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser vertikal (SV) dan ketebalan pada suatu struktur tanah. Metode ini memanfaatkan sifat dispersif gelombang Rayleigh pada sistem tanah berlapis. Sifat penetrasi gelombang Rayleigh pada suatu medium dipengaruhi oleh panjang gelombang dan frekuensi. Penggunaan metode MASW telah diaplikasikan sebagai evaluator pada infrastruktur, misalnya identifikasi konstruksi pondasi bangunan, bendungan, tanggul, pendeteksian profil tanah, dan lain-lain (Foti & Lai, 2015).

Pada umumnya, pendekatan kurva dispersi gelombang Rayleigh ada dua, yaitu model bumi berlapis dan model bumi tidak berlapis, dengan parameter kecepatan gelombang geser meningkat secara linier sebagai fungsi kedalaman. Pendekatan yang kedua ini biasa disebut dengan model *Gibson Half-space*. Pendekatan ini cukup akurat untuk mengidentifikasi kecepatan gelombang geser dari kurva dispersi gelombang Rayleigh yang diukur melalui metode *Multichannel Analysis of Surface Wave*

(MASW) ataupun melalui metode *Spectrum Analysis of Surface Wave* (SASW), meskipun kurva dispersi gelombang Rayleigh yang teridentifikasi dari pengukuran sangat terbatas (Xia, 2006). Oleh karena itu, dalam kesempatan ini akan dikembangkan inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh dari model *Gibson Half-Space* berbasis *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD). Kedua metode ini merupakan optimasi lokal. Dengan demikian, parameter bawah permukaan dapat diestimasi secara efisien, sederhana dan cepat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir ini adalah bagaimana pengaplikasian metode inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh pada model *Gibson Half-space* yang berbasis *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD).

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari tugas akhir ini adalah untuk mengaplikasikan metode inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh pada model *Gibson Half-space* yang berbasis *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD).

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah,

1. Metode pemodelan inversi dilakukan pada satu data sintetik dengan dan/ tanpa tambahan *Gaussian noise* sebesar 10% dan satu data lapangan.
2. Program aplikasi yang digunakan untuk proses pengolahan data adalah *software* MATLAB.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan

informasi mengenai kecepatan gelombang geser vertikal (SV) menggunakan pemodelan *Gibson Hal-Space* dengan inversi gelombang Rayleigh sebagai evaluator intensitas geser yang efektif dan cepat untuk menganalisis kerentanan tanah.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penulisan tugas akhir ini tersusun dari beberapa bab. Sistematika penulisannya sebagai berikut:

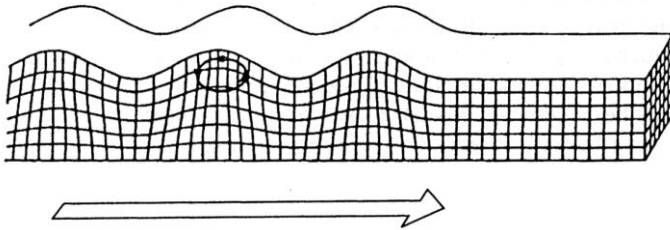
- BAB I** : Pendahuluan
Berisi mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.
- BAB II** : Tinjauan Pustaka
Berisi tentang teori-teori yang mendukung penelitian ini.
- BAB III** : Metodologi Penelitian
Berisi tentang pemaparan mengenai proses dan langkah-langkah penelitian yang dilakukan untuk mengolah data seismik sehingga mendapatkan frekuensi, kurva dispersi, dan kecepatan gelombang.
- BAB IV** : Analisis Data dan Pembahasan
Bab ini menjelaskan analisis penelitian yang menghasilkan suatu informasi penting.
- BAB V** : Kesimpulan dan Saran
Berisi tentang hasil yang didapatkan setelah melakukan penelitian sesuai tujuan penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik tersebut.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Rayleigh

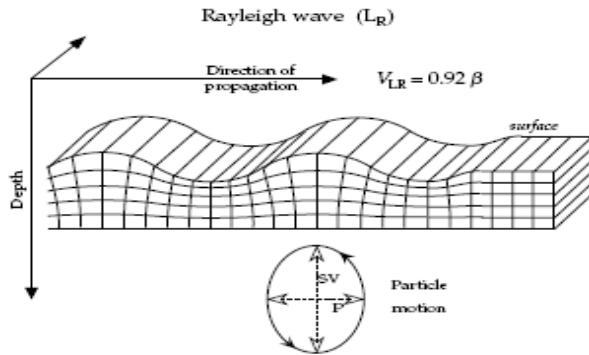
Gelombang Rayleigh adalah jenis gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang tekan dengan gelombang geser secara konstruktif. Gerakan partikel pada *wavefront* gelombang Rayleigh terdiri dari kombinasi gelombang P dan S pada bidang vertikal dengan pola gerakan partikel secara *ellipse retrograde*. Gelombang Rayleigh merupakan salah satu jenis gelombang permukaan yang merambat pada medium tak berlapis (*half-space*). Karakteristik lain dari gelombang Rayleigh adalah amplitudonya menurun atau berkurang secara eksponensial terhadap kedalaman di bawah permukaan. Pada umumnya, gelombang ini mempunyai frekuensi rendah dengan spektrum yang tidak tajam. Gelombang Rayleigh dapat mencitrakan struktur bawah permukaan dengan mudah yang diaplikasikan pada karakterisasi geoteknik karena gelombang Rayleigh mempunyai sifat yang unik, yaitu setiap perambatan gelombang yang melewati batas lapisan material bumi akan mengalami dispersi (Lai, 1998).



Gambar 2.1 Gerakan partikel gelombang Rayleigh
(Lai, 1998)

Gelombang Rayleigh sangat baik digunakan untuk mengidentifikasi masalah struktur tanah karena pengurangan energi dalam perambatannya lebih rendah dari jenis gelombang seismik lainnya. Energi gelombang Rayleigh mencapai 67% dari

energi total yang dihasilkan oleh pemicu (*exciting force*) yang diterapkan pada permukaan tanah (Santosa, 2002).



Gambar 2.2 Pola gerakan partikel gelombang Rayleigh (Lowrie, 2007)

2.2 Inversi Gelombang Rayleigh

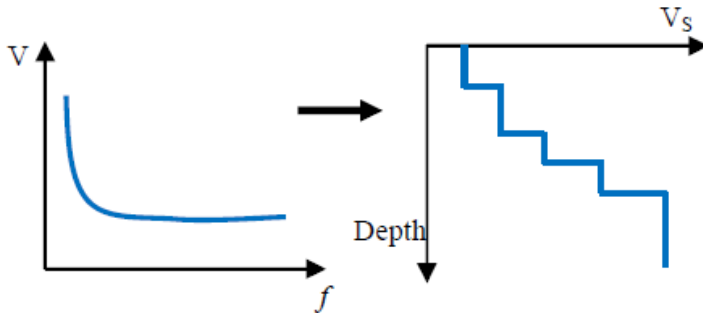
Gelombang seismik merambat secara mekanik ke dalam medium lapisan bumi yang merupakan gelombang elastis atau mekanik yang ditimbulkan akibat regangan medium elastis. Berdasarkan sistem penjarannya, gelombang seismik dibagi menjadi dua jenis, yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan. Energi gelombang seismik 67% berupa energi gelombang permukaan (Santosa, 2002). Gelombang permukaan digunakan untuk estimasi kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman. Nilai gelombang geser ini dapat digunakan untuk mengetahui sifat (porositas, densitas, saturasi air dan jenis batuan) struktur bawah permukaan (Santoso, 2002).

Gelombang permukaan yang dapat mencitrakan bawah permukaan yang diaplikasikan pada karakterisasi geoteknik adalah gelombang Rayleigh. Hal ini disebabkan oleh gelombang Rayleigh mempunyai sifat dimana perambatan yang melewati batas lapisan material bumi mengalami dispersi. Pembuatan kurva dispersi gelombang Rayleigh dapat dilakukan dengan cara

mengkorelasikan dua gelombang Rayleigh pada fungsi frekuensi yang terdeteksi oleh *geophone* dengan jarak tertentu (Lai, 1998).

Inversi gelombang Rayleigh dilakukan untuk memodelkan struktur bawah permukaan. Penyelesaian permasalahan untuk kurva dispersi kecepatan gelombang Rayleigh (v_R) adalah pemodelan ke depan (*forward modeling*) dengan mengetahui parameter-parameter, misalnya densitas ρ , kecepatan gelombang P (v_p), dan kecepatan gelombang S (v_s). Setelah diketahui v_R , maka dilakukan pemodelan ke belakang (*inversion modeling*). Secara umum, kedua metode penyelesaian ini dapat dilakukan bersama-sama. Pemodelan ke belakang dilakukan dengan penentuan model parameter fisis pengukuran-pengukuran yang disebut identifikasi parameter model, dengan menginversikan variabel-variabel pengamatan untuk mendapatkan pendekatan yang baik dari parameter model yang bergantung pada pemilihan fungsi respon. Dalam domain frekuensi, fungsi respon meliputi amplitudo pergeseran, fase pergeseran, atau fase spektrum dari sinyal gelombang Rayleigh.

Inversi gelombang Rayleigh (Gambar 2.3) adalah suatu proses yang dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter elastis kurva dispersi dengan mengasumsikan sebuah model horizontal berlapis sebagai model awal untuk mendapatkan model parameter baru. Dalam menentukan pemodelan inversi, terutama identifikasi model-model parameter yang menggunakan optimasi konstrain, bukanlah hal yang baru dan secara luas penggunaannya untuk data tunggal dan data yang tidak pasti (data yang bersifat bias atau *random error*). Penyelesaian dari proses inversi untuk menentukan parameter model bergantung pada kemampuan secara sintetik dengan memberikan harga yang mendekati harga data eksperimen dengan cara melakukan pengulangan (iterasi) untuk mendapatkan hasil yang mendekati sebenarnya (Sholihan, 2010).



Gambar 2.3 Inversi gelombang Rayleigh (Sholihan, 2010)

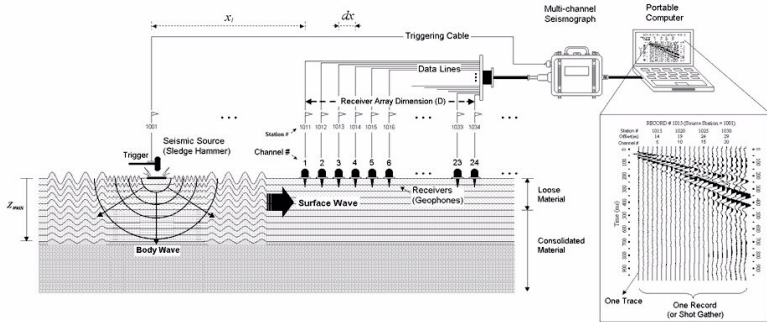
2.3 *Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW)*

Metode MASW diperkenalkan oleh Park et al (1999) yang berkaitan dengan keheterogenan medium tanah di bawah permukaan yang kemungkinan bervariasi secara lateral. Sifat keheterogenan medium ini dapat mengubah sifat dispersif dari medium dan tidak dapat teramati dengan baik oleh metode sebelumnya, yaitu metode SASW (*Spectral Analysis of Surface Wave*) yang hanya menggunakan dua *channel*.

Metode ini banyak dikembangkan oleh beberapa universitas dalam pengaplikasiannya. Metode MASW dapat diaplikasikan untuk pemetaan kecepatan gelombang sekunder pada suatu daerah yang dapat menganalisis variasi *stiffness*, baik secara vertikal maupun horizontal menggunakan analisis dispersi gelombang Rayleigh mode fundamental (Park & Miller, 2004). Selain itu, metode ini juga pernah digunakan untuk menganalisis sebaran *bed rock* yang sangat berguna untuk analisis ketekniksipilan (Miller & Xia, 1999). Pada analisis geologi dangkal, metode MASW digunakan untuk membatasi kenampakan geologi bawah permukaan yang memisahkan lapisan lempung dengan batu pasir dan gravel yang tersaturasi air (Xia, 2006).

Dalam bidang monitoring sifat pondasi suatu bangunan untuk menganalisis kondisi bawah tanah (Miller et al, 1999 & Yeluru, 2013), terutama pada daerah yang rawan ambles,

geophone biasanya yang ditancapkan di dalam tanah harus dimodifikasi, sehingga dapat digunakan dengan hanya diletakkan di permukaan lantai beton. Dalam bidang teknik sipil, pemakaiannya menggunakan metode MASW untuk mengkarakterisasi seismik dari lapisan tanah atau pondasi (Park & Miller, 2005). Selain itu, metode MASW, yang dalam pengolahan dan akuisisi datanya menggunakan teknik *common mid-point* (CMP), digunakan untuk pencitraan dangkal variabel kecepatan gelombang S di bawah menara sutet untuk analisis geoteknik. Analisis lebih lanjut pencitraan gelombang Vs ini dilakukan bersama-sama dengan analisis gelombang Vp-nya (Hartantyo, 2009).



Gambar 2.4 Skema pengukuran dan perekaman data lapangan (Park et al, 1999)

2.4 Metode Inversi pada *Gibson Half-space*

Pemodelan ke depan (*forward modeling*) yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari model *Gibson Half-space*. *Gibson Half-space* (Gibson, 1967) didefinisikan sebagai medium heterogen elastis tak berlapis dengan densitas ρ dan *Poisson's ratio* ν , yang mana koefisien geser G -nya meningkat secara linier terhadap kedalaman. Variasi koefisien geser pada *Gibson Half-space* dapat dinyatakan dengan:

$$G = G_0(1 + mz) \quad (2.1)$$

dimana $G_0 > 0$ adalah koefisien geser pada permukaan, m adalah ukuran ketidaksamaan yang mempunyai dimensi inversi panjang. Batas nilai $m=0$ sama dengan medium homogen elastis tak berlapis, dimana gelombang Rayleigh tidak menunjukkan adanya dispersi (Xia et al, 2006).

Vardoulakis dan Verttos (1988) menjelaskan bahwa pendekatan aljabar dari hukum dispersi untuk gelombang Rayleigh pada *Gibson Half-space* dapat ditulis sebagai berikut:

$$C \cong \frac{1}{\Omega_v} + \sqrt{\frac{1}{\Omega_v^2} + \frac{1}{0.35(3.6-v)}} , (0.25 \leq v \leq 0.5) \quad (2.2)$$

dengan

$$C = \frac{c}{v_{s0}} \quad (2.3)$$

$$\Omega_v = \frac{0.56(3.6-v)\Omega}{1.5+v} \quad (2.4)$$

dengan c adalah kecepatan fase gelombang Rayleigh dan v_{s0} adalah kecepatan gelombang S pada permukaan tanah.

$$v_{s0} = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad (2.5)$$

$$\Omega = \frac{2\pi f}{mv_{s0}} \quad (2.6)$$

f adalah frekuensi (Hz), ρ adalah densitas rata-rata *Gibson Half-space*, C adalah tetapan tak berdimensi kecepatan, dan Ω adalah tetapan tak berdimensi frekuensi. Vardoulakis dan Verttos (1988) menjelaskan bahwa *error* nisbi yang dihasilkan pada pendekatan Persamaan (2.2) adalah 1-3%. Berdasarkan pada Persamaan (2.1),

kecepatan gelombang S pada kedalaman z dapat ditulis sebagai berikut:

$$v_s(z) = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_0(1+mz)}{\rho}} = v_{s0}\sqrt{(1+mz)} \quad (2.7)$$

Jika densitas *Gibson Half-space* ρ dapat ditetapkan sebagai makna lain, maka modulus geser, modulus Young, dan modulus bulk pada kedalaman z dapat diestimasi dengan kecepatan gelombang S dan *Poisson's ratio*.

Persamaan (2.2) menunjukkan bahwa mode dasar gelombang Rayleigh pada *Gibson Half-space*, c , merupakan fungsi kecepatan gelombang S pada permukaan v_{s0} , ukuran ketidaksamaan m , dan *Poisson's ratio* v . Turunan parsial dari Persamaan (2.2) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial c}{\partial v_{s0}} = \frac{2}{\Omega_v} + \sqrt{\frac{1}{\Omega_v^2} + \frac{1}{0.35(3.6-v)}} + \frac{1}{\Omega_v^2} \left(\frac{1}{\Omega_v^2} + \frac{1}{0.35(3.6-v)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial c}{\partial m} = \frac{1}{\Omega_v^2} \left[\Omega_v + \left(\frac{1}{\Omega_v^2} + \frac{1}{0.35(3.6-v)} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \frac{v_{s0}}{m} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial c}{\partial v} = \left[-\frac{1}{\Omega_v^3} \Omega'_v + 0.5 \left(\frac{1}{\Omega_v^2} + \frac{1}{0.35(3.6-v)} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{2\Omega'_v}{\Omega_v^3} + \frac{1}{0.35(3.6-v)^2} \right) \right] v_{s0} \quad (2.10)$$

dengan

$$\Omega'_v = -\frac{0.56}{(1.5+v)} \left(1 + \frac{3.6-v}{1.5+v} \right) \Omega \quad (2.11)$$

merupakan turunan parsial dari Ω_v terhadap *Poisson's ratio* v . *Poisson's ratio* pada Persamaan (2.2) mempunyai nilai 0.25 – 0.5. Batasan ini kemudian diganti dengan mensubstitusikan variabel:

$$v = 0.5(b_2 + b_1) + 0.5(b_2 - b_1)\sin p, 0.25 \leq b_1 \leq b_2 \leq 0.5 \text{ dan } -\infty < p < \infty \quad (2.12)$$

Pada kasus ini, Persamaan (2.10) akan digantikan oleh persamaan berikut:

$$\frac{\partial c}{\partial p} = \frac{\partial c}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial p} = 0.5(b_2 - b_1) \cos p \frac{\partial c}{\partial v} \quad (2.13)$$

Dengan memanipulasi Persamaan (2.2), (2.8), (2.9), dan (2.13), dapat diketahui bahwa penentuan gelombang Rayleigh dalam *Gibson Half-space*, c , merupakan sebuah fungsi dari v_{s0} , m , dan p , yang didefinisikan oleh Persamaan (2.12) dan terhubung langsung pada *Poisson's ratio*. Parameter pemodelan bumi dapat dinyatakan sebagai elemen vektor $\vec{x} = [v_{s0}, m, p]^T$. Dengan cara yang sama, data pengukuran kecepatan fase gelombang Rayleigh pada m frekuensi yang berbeda dapat dinyatakan sebagai elemen vektor $\vec{b} = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_m]^T$. Dengan demikian, fungsi objeknya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Phi = (J\Delta\vec{x} - \vec{b})^T (J\Delta\vec{x} - \vec{b}) \quad (2.14)$$

dimana $\vec{b} - \vec{c}(\vec{x}_0) = \vec{b}$, dan \vec{x}_0 adalah estimasi awal parameter pemodelan bumi untuk *Gibson Half-space*, $\Delta\vec{x}$ adalah modifikasi tebakan awal \vec{x}_0 , dan J adalah matriks Jacobian yang terdiri dari m baris dan 3 kolom. Elemen matriks Jacobian adalah turunan parsial pertama \vec{c} terhadap parameter pemodelan bumi, yang didefinisikan oleh Persamaan (2.8), (2.9), dan (2.13). Karena jumlah data yang terdapat pada kurva dispersi pada umumnya lebih banyak daripada jumlah parameter yang digunakan untuk

pemodelan bawah permukaan, maka kasus ini disebut dengan kasus *over-determined*. Sehingga, Persamaan (2.14) dapat diselesaikan dengan teknik optimasi. Solusi redaman *least-square* pada Persamaan (2.14) dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$(A^T A + \lambda I) \Delta \vec{x} = A^T \vec{d} \quad (2.15)$$

dimana $A = J$ dan \vec{d} adalah jumlah data. Persamaan (2.15) merupakan interpolasi antara solusi *least-square* dan solusi turunan paling akhir (metode gradien) (Xia et al, 2006).

Marquardt (1963) menjelaskan bahwa faktor redaman λ membatasi arah $\Delta \vec{x}$ dan kecepatan pemodelan untuk mencapai konvergensi. Solusi Persamaan (2.15) merupakan interpolasi antara solusi *least-square* ($\lambda = 0$) dan solusi turunan paling akhir ($\lambda \rightarrow \infty$). Masalah *least-square* dapat diselesaikan menggunakan metode optimasi *Levenberg-Marquardt* (L-M). Metode L-M juga merupakan metode *least-square* teredam (*damped least-square*) yang bisa digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *non-linier least squares*. Permasalahan ini terdapat pada pencocokan kurva *least-squares*. Metode L-M merupakan salah satu metode optimasi yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *fitting* kurva umum. Dalam metode ini, terdapat faktor redaman yang digunakan untuk menentukan batas minimum dan maksimum dari permasalahan tersebut untuk mencapai batas konvergensi yang lebih cepat. Beberapa nilai λ yang berbeda harus diuji untuk memastikan bahwa faktor redaman optimal. Dalam kasus ini, nilai λ yang digunakan adalah 0.0055. Pada nilai ini, iterasi dapat dicapai dengan proses yang cepat. Sehingga, ketika determinan dari $A^T A$ bernilai nol, metode optimasi ini tetap memiliki nilai yang berasal dari faktor redaman λ dan matriks satuan I .

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, beberapa nilai λ yang berbeda perlu diuji pada setiap iterasi untuk memastikan bahwa telah didapatkan faktor redaman yang tepat.

Menginversikan matriks $(A^T A + \lambda I)$ secara langsung merupakan cara yang tidak efisien untuk mendapatkan faktor redaman yang tepat karena matriks inversi $(A^T A + \lambda I)$ harus dihitung setiap waktu ketika faktor redaman λ diubah. Hal ini disebabkan ketika determinan dari $A^T A$ bernilai nol, maka matriks tersebut kurang stabil jika diinversikan secara langsung, sehingga dibutuhkan juga metode optimasi lain, yaitu *Singular Value Decomposition* (SVD)

Metode SVD merupakan generalisasi dari dekomposisi eigen yang bisa digunakan untuk menganalisis matriks segi-empat (dekomposisi eigen didefinisikan sebagai matriks kuadrat). SVD ini didasarkan pada teori aljabar linier yang menjelaskan bahwa matriks segi-empat A dapat dijabarkan dalam tiga matriks, yaitu matriks orthogonal U , matriks diagonal S , dan *transpose* dari matriks orthogonal V (Strang, 1993). Setelah menerapkan teknik (SVD) pada Persamaan (2.15), didapatkan:

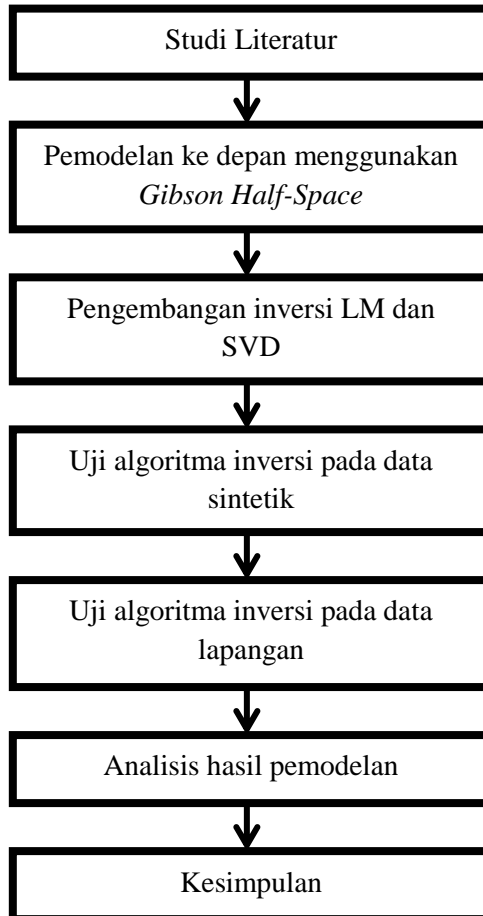
$$\Delta \vec{x} = V(\Lambda^2)^{-1} \Lambda U^T \vec{d} \quad (2.16)$$

dimana $V = [\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots, \vec{v}_n]$, dengan \vec{v}_i ($i = 1, 2, \dots, n$; n sama dengan 3 pada masalah inversi) adalah vektor eigen matriks $A^T A$, dan $\lambda = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_n})$. Matriks diagonal memiliki elemen-elemen yang merupakan akar dari nilai eigen $A^T A$, $U = [\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3, \dots, \vec{u}_n]$, $\vec{u}_i = A\vec{v}_i/\lambda_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Karena matriks inversi pada Persamaan (2.16) merupakan sebuah matriks diagonal. Berdasarkan pada Persamaan (2.16), solusi iterasi dapat diperoleh dengan iterasi $\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k + \Delta \vec{x}$. Solusi akhir dapat diperoleh ketika selisih *root mean-square* (rms) mencapai batas (*threshold*) yang diberikan atau jumlah maksimum iterasi dicapai (Golub & Reinsch, 1970).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan kerja yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

1. Studi Literatur
Pada tahap ini, dilakukan pembelajaran untuk mengetahui permasalahan penelitian, latar belakang penelitian, teori-teori mengenai solusi permasalahan, dan penentuan metode penelitian.
2. Pemodelan ke Depan (*Forward Modeling*)
Pemodelan ke depan merupakan tahap awal dari proses pengolahan data. Pada tahap ini pemodelan yang digunakan adalah model *Gibson Half-Space*. Dari pemodelan ini, dihasilkan nilai frekuensi yang digunakan sebagai parameter pada proses inversi. Selain itu pada tahap ini, juga ditentukan parameter-parameter pemodelan lain yang dibutuhkan, yaitu v_{so} , m dan v . Data yang digunakan pada pemodelan ini adalah data seismik 2D.
3. Pengembangan Inversi
Pada tahap ini, akan dilakukan pemodelan untuk hasil dari *forward modeling* menggunakan metode inversi. Metode inversi yang digunakan adalah metode *Levenberg-Marquardt* (LM) dan *Singular Value Decomposition* (SVD). Metode *Levenberg-Marquardt* digunakan sebagai interpolasi antara solusi *least-square* ($\lambda = 0$) dan solusi turunan paling akhir ($\lambda \rightarrow \infty$). Metode ini ditunjukkan pada persamaan (2.15). faktor redaman yang digunakan pada proses inversi dengan metode L-M adalah 0.0055. Kemudian dilakukan proses inversi matriks dengan menerapkan teknik SVD yang ditulis dalam persamaan (2.16).
4. Uji Algoritma Inversi pada Data Sintetik
Setelah didapatkan metode inversi algoritma pada tahap 3, lalu dilakukan pengujian metode tersebut menggunakan data input berupa data sintetik yang bebas *noise* dan ditambah *noise* 10%.
5. Uji Algoritma Inversi pada Data Lapangan

Hasil uji data sintetik yang telah didapatkan akan dibandingkan dengan data lapangan. Sehingga, dilakukan pengujian lebih lanjut dengan data lapangan sebagai data inputnya.

6. Analisis Hasil Pemodelan

Pada tahap ini akan dilakukan proses analisis data hasil *forward modeling* dan pemodelan inversi, baik untuk data sintetik maupun data lapangan. Analisis hasil berupa kurva dispersi gelombang Rayleigh pada *Gibson Half-space*. Dari analisis hasil inversi kurva dispersi, didapatkan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman. Dengan demikian, dapat diketahui perbandingan dari kedua pemodelan tersebut.

7. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis hasil dan pembahasan, maka ditarik kesimpulan sesuai dengan permasalahan dan solusinya.

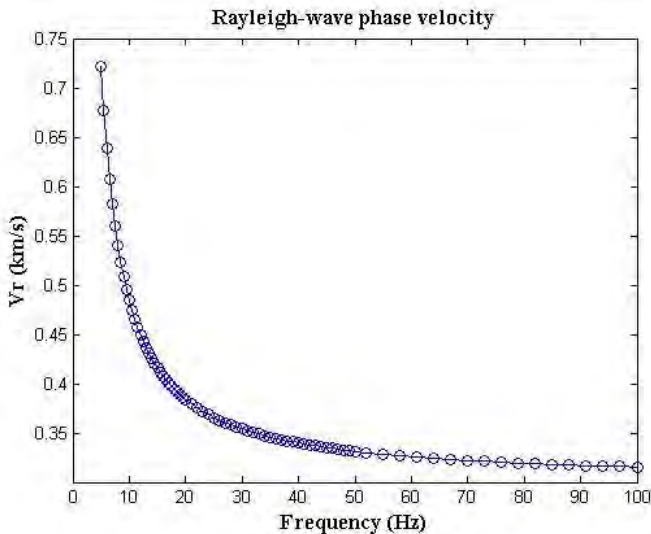
“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan ke Depan *Gibson Half-Space*

Metode MASW merupakan teknik *non-invasive* yang dapat digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang geser pada tanah dengan mengukur pergerakan gelombang di atas permukaan tanah melalui analisis gelombang Rayleigh. Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang akan terdispersi saat melewati batas lapisan bumi.

Pada pemodelan *Gibson Half-space*, didapatkan kurva dispersi kecepatan fase gelombang Rayleigh (V_r) sebagai fungsi frekuensi yang dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kurva dispersi gelombang Rayleigh sebagai fungsi frekuensi

4.2 Inversi Kurva Dispersi pada Data Sintetik

Pada tahap ini, akan dilakukan pengujian kedua metode pemodelan ke belakang (*inversion modeling*) pada data kurva dispersi sintetik yang didapatkan dari proses *forward modeling*. Metode inversi yang digunakan adalah metode *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD). Kedua metode ini merupakan optimasi lokal, sehingga membutuhkan parameter awal berupa kecepatan gelombang geser (v_{s0}) pada permukaan, ketebalan lapisan (m), dan *Poisson's ratio* (ν). Parameter-parameter ini menjadi nilai awal dari iterasi yang dilakukan.

Parameter-parameter tersebut kemudian digunakan untuk mengestimasi kecepatan fase gelombang Rayleigh melalui pemodelan ke depan (*forward modeling*). Kecepatan gelombang Rayleigh model ini dibandingkan dengan kecepatan gelombang Rayleigh data sintetik awal yang dianggap sebagai data observasi. Sehingga, dari proses ini didapatkan pula nilai *error*. Sesuai dengan penelitian sebelumnya (Xia, 2004), nilai parameter awal yang digunakan adalah $v_{s0} = 90 \text{ m/s}$, $m = 2.444 \text{ m}^{-1}$, dan $\nu = 0.320$. Nilai *Poisson's ratio* yang diberikan dibatasi pada rentang 0.27-0.50, sebagaimana diungkapkan dalam Persamaan (2.12).

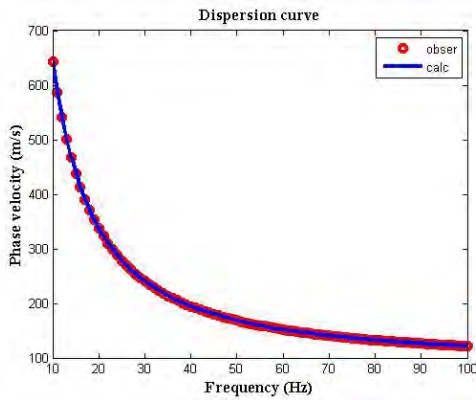
4.2.1 Kurva Dispersi dengan Frekuensi 10-100 Hz

Pada pemodelan inversi ini digunakan frekuensi antara 10-100 Hz dengan indeks nilai satu untuk setiap titik frekuensi. Sehingga, kecepatan fase gelombang Rayleigh yang didapatkan banyak. Pada tahap ini, juga terdapat dua macam perlakuan, yaitu pengujian kurva dispersi data sintetik tanpa penambahan *noise* dan pengujian kurva dispersi data sintetik dengan penambahan *noise*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *noise* terhadap hasil inversi kurva dispersi.

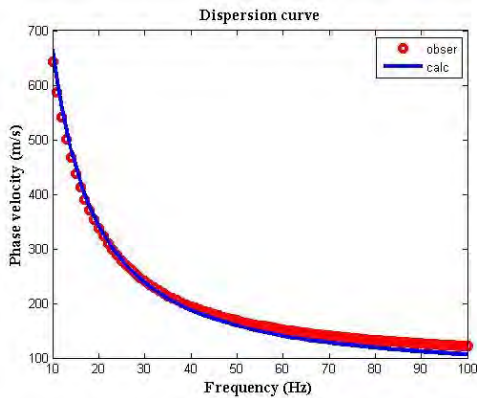
Gambar 4.2 merupakan hasil inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh tanpa penambahan *noise* melalui metode L-M dan SVD. Gambar ini merupakan hasil pencocokkan kurva

dispersi hasil inversi dan data “observasi”. Gambar ini menunjukkan bahwa kedua metode mempunyai kecocokan yang sangat bagus terhadap kurva dispersi hasil perhitungan, terutama yang menggunakan metode L-M. Pada metode L-M, kurva data observasi berimpit dengan kurva data perhitungan. Hal ini dipengaruhi oleh adanya pengali *Lagrange* (λ) sebagai faktor redaman. Pengali *Lagrange* digunakan untuk membatasi nilai tebakan awal parameter dan kecepatan konvergensi. Nilai λ yang digunakan adalah 0.0055. Dengan nilai ini, dapat dilakukan proses inversi L-M yang cepat dengan tingkat keakuratan data yang lebih baik yang konvergen terhadap iterasi maksimum. Nilai ini juga diuji untuk memastikan bahwa nilai ini dapat menghasilkan faktor redaman yang optimal.

Kedua kurva dispersi di atas mempunyai tingkat keakuratan yang bagus. Hal ini dapat dilihat dari kurva hasil inversi yang berhimpit terhadap kurva hasil pengukuran. Selain itu, didapatkan pula nilai *root means square error* (RMSE) pada metode L-M dan metode SVD adalah 0.000457 m/s dan 11.32099 m/s. Nilai *error* ini didapatkan pada iterasi maksimum, yaitu pada iterasi kelima. Nilai *error* yang didapatkan ini sesuai dengan nilai *error* rendah yang diinginkan (kurang dari 40 m/s, sesuai dengan nilai *error* yang didapatkan pada penelitian sebelumnya). Sehingga, kedua metode ini sangat efektif untuk digunakan sebagai metode inversi untuk menghasilkan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman.

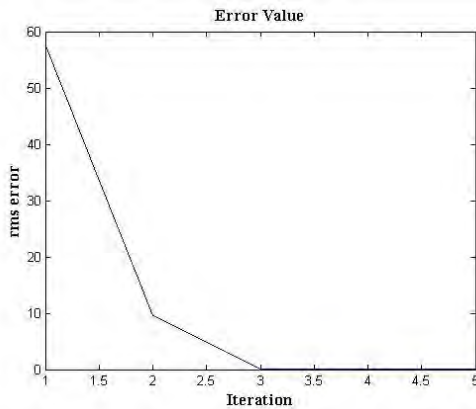


(a)

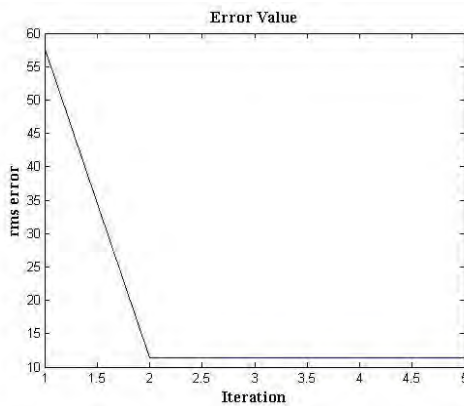


(b)

Gambar 4.2 Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi: (a) metode L-M (b) metode SVD



(a)



(b)

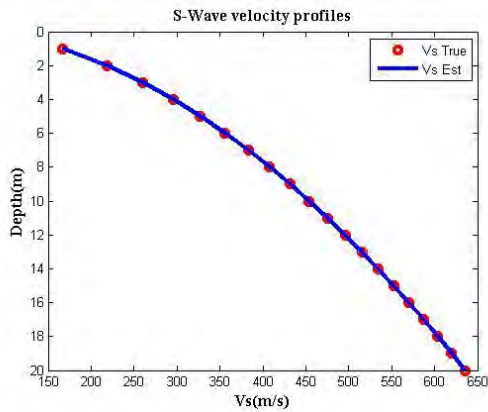
Gambar 4.3 Perbandingan RMS *error* dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD

Gelombang Rayleigh dapat digunakan untuk mengestimasi profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi

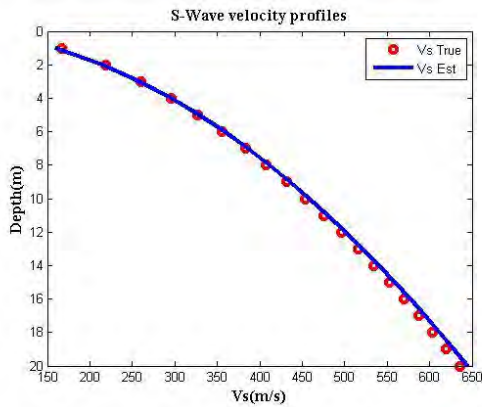
kedalaman. Kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman didapatkan dari proses inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh. Gambar 4.4 merupakan hasil estimasi kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman untuk masing-masing metode. Kecepatan gelombang geser yang didapatkan dari hasil inversi ada 20 titik sesuai dengan jumlah kedalaman yang diestimasi. Gelombang geser pada kedalaman pertama mempunyai nilai yang lebih kecil. Untuk kedalaman selanjutnya, nilai gelombang geser yang didapatkan semakin besar. Sehingga, dapat dikatakan bahwa semakin dalam lapisannya, maka semakin besar pula kecepatan gelombang geser yang terjadi.

Kecepatan gelombang geser hasil inversi pada metode L-M mempunyai tingkat kecocokkan yang lebih bagus terhadap gelombang geser hasil pengukuran daripada hasil yang didapatkan dari metode SVD. Selain itu, nilai *rms error* yang didapatkan oleh metode L-M juga lebih rendah daripada nilai *rms error* pada metode SVD. Hal ini disebabkan oleh adanya faktor redaman λ yang diberikan pada metode L-M.

Perlakuan yang kedua adalah pengujian kurva dispersi untuk data sintetik dengan penambahan *noise*. *Noise* yang digunakan adalah *Gaussian noise* yang memiliki amplitudo sebesar 10%. Nilai ini merupakan nilai standar *noise* yang sering digunakan dalam uji data sintetik. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui perbandingan hasil inversi kedua metode yang ditambah *noise* maupun tanpa ditambah *noise*.

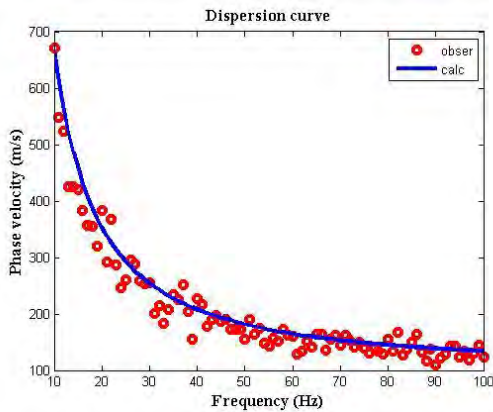


(a)

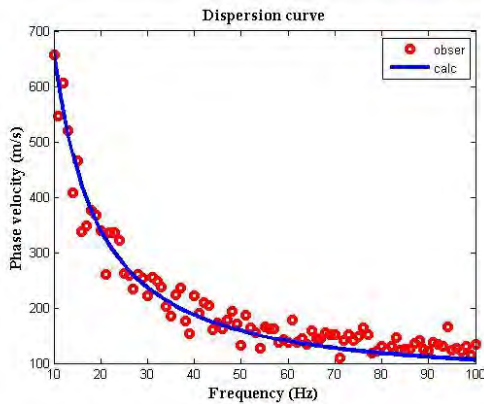


(b)

Gambar 4.4 Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD



(a)

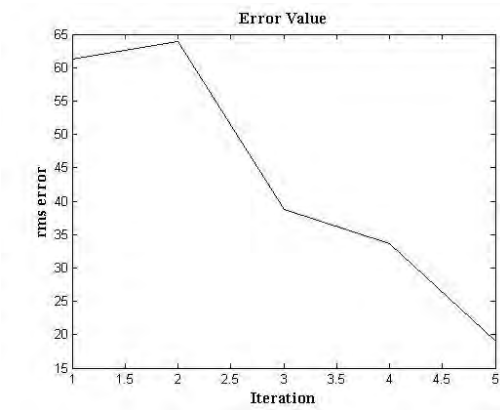


(b)

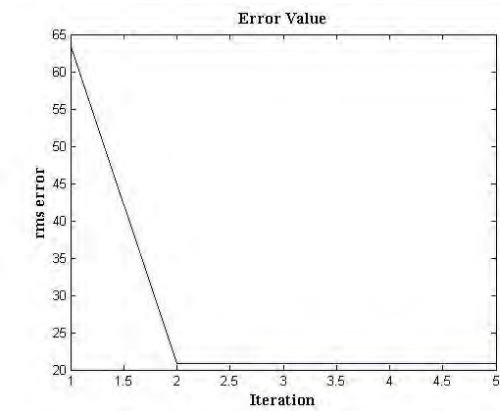
Gambar 4.5 Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi dengan *noise*: (a) metode L-M (b) metode SVD

Gambar 4.5 merupakan kurva dispersi yang menggambarkan data sintetik kecepatan gelombang Rayleigh “observasi” yang telah ditambahi *noise* 10%. Bulatan merah merupakan sebaran data sintetik observasi, sedangkan garis biru merupakan data perhitungan hasil inversi. Besar kecepatan gelombang Rayleigh yang dihasilkan pada kurva dispersi di atas mempunyai nilai yang tidak terlalu jauh dengan nilai kurva dispersi yang tidak ditambahi *noise*. Kedua kurva tersebut menunjukkan bahwa kedua metode merupakan dua jenis metode inversi yang *robust* terhadap *noise*. *Noise* yang ditambahkan dalam data sintetik mempunyai pengaruh yang tidak terlalu besar terhadap hasil inversi. Perbandingannya dapat dilihat antara Gambar 4.2 dan Gambar 4.5.

Dari hasil tersebut, didapatkan pula *rms error* untuk kedua metode yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Untuk metode L-M, nilai *error* yang didapatkan adalah 18.96372 m/s. Metode ini konvergen pada iterasi kelima dengan dua kali *running*. Sedangkan untuk metode SVD nilai *error*-nya adalah 20.8403 m/s yang konvergen pada iterasi kelima dengan satu kali *running*. *Running* adalah proses yang digunakan untuk menjalankan *script* inversi pada program Matlab.

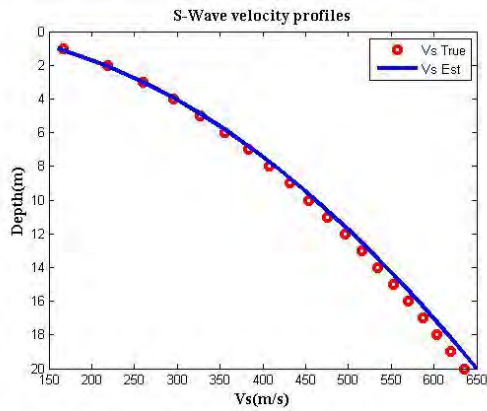


(a)

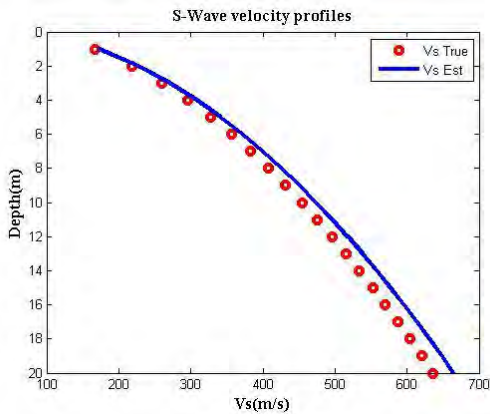


(b)

Gambar 4.6 Perbandingan RMS *error* dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD



(a)



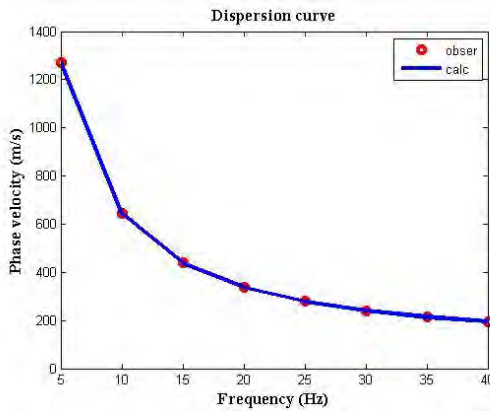
(b)

Gambar 4.7 Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan (a) metode L-M (b) metode SVD

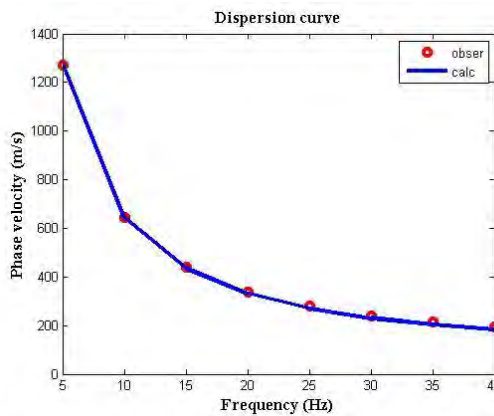
Gambar 4.7 merupakan kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman hasil inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh yang ditambah *noise*. Dari kedua metode dapat dilihat adanya perbedaan hasil inversi yang didapatkan pada Gambar 4.4. Garis biru yang menggambarkan data sintetik hasil inversi agak menyimpang dari bulatan merah yang menunjukkan data sintetik pengukuran. Hal ini disebabkan oleh adanya tambahan *noise* pada data sintetik tersebut. Akan tetapi, perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan terhadap hasil inversi yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sehingga, dapat dikatakan bahwa kedua metode yang digunakan tersebut *robust* terhadap *noise*.

4.2.2 Kurva Dispersi dengan Frekuensi 5-40 Hz

Pada tahap pemodelan inversi ini, perlakuan yang diberikan sama dengan perlakuan yang diberikan pada pemodelan sebelumnya (Subbab 4.2.1), yaitu pengujian kurva dispersi data sintetik tanpa pemberian *noise* dan pengujian kurva dispersi data sintetik dengan pemberian *noise*. Yang membedakan tahap ini dengan tahap sebelumnya adalah nilai frekuensi. Nilai frekuensi yang digunakan adalah 5-40 Hz dengan indeks nilai 5 untuk setiap titik frekuensi. Sehingga, titik-titik nilai kecepatan fase yang didapatkan lebih sedikit daripada tahap sebelumnya.

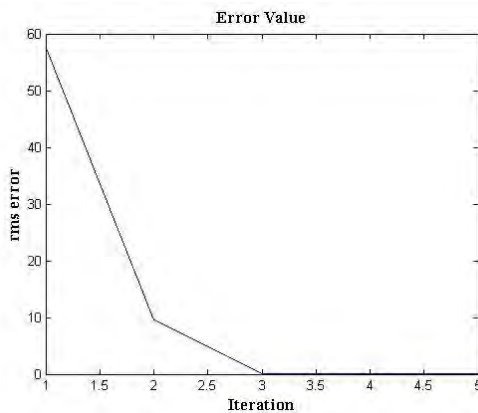


(a)

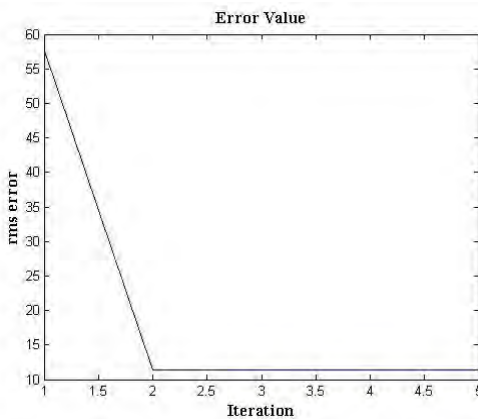


(b)

Gambar 4.8 Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi: (a) metode L-M (b) metode SVD



(a)



(b)

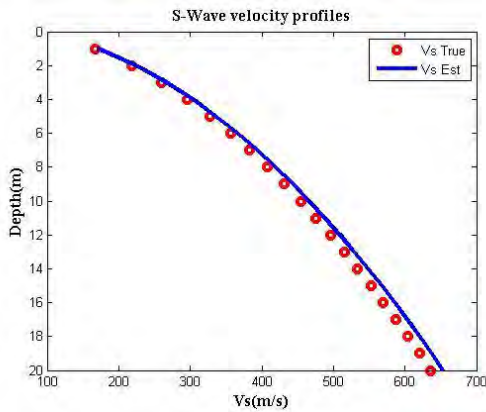
Gambar 4.9 Perbandingan RMS *error* dengan iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa kurva dispersi kecepatan fase gelombang Rayleigh yang dihasilkan sebagai fungsi frekuensi mempunyai nilai yang sama dengan kurva

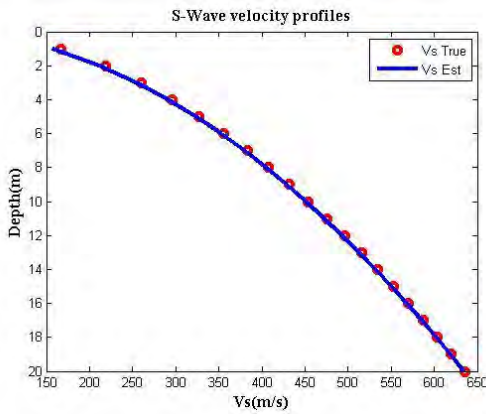
dispersi yang dihasilkan pada Gambar 4.2. Pada titik-titik frekuensi tersebut, besar kecepatan fase gelombang Rayleigh yang dihasilkan mempunyai nilai yang sama besar dengan nilai yang dihasilkan pada Gambar 4.2. Sehingga, jumlah titik frekuensi yang digunakan tidak terlalu berpengaruh terlalu besar terhadap kurva dispersi yang dihasilkan. Selain itu, *rms error* yang dihasilkan dari kedua metode juga tidak terlalu besar. Nilai *error* yang dihasilkan pada metode L-M dan metode SVD adalah 0.000117 m/s dan 7.810383 m/s yang konvergen pada iterasi maksimum. Jika dilihat dari nilai *error* yang dihasilkan, dapat disimpulkan bahwa pengujian kurva dispersi yang akurat dapat dilakukan dengan menggunakan frekuensi yang rendah. Hal ini dapat dijadikan sebagai salah satu acuan untuk pengujian data lapangan.

Gambar 4.10 menunjukkan hasil profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman. Pada gambar tersebut, dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan gelombang gesernya, maka semakin rendah pula kedalamannya (semakin dangkal). Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang gelombang sebagai fungsi frekuensi, jika semakin rendah frekuensinya maka kedalamannya semakin tinggi (Waskito, 2013). Kecepatan gelombang geser yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, tidak jauh beda dengan kecepatan gelombang geser pada Gambar 4.4.

Pada uji coba data sintetik ini, juga dilakukan pengujian data yang telah ditambahi *noise* 10%. Gambar 4.11 merupakan hasil kurva dispersi yang telah ditambah *noise*.

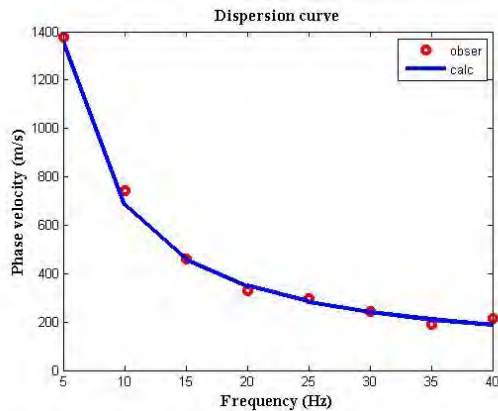


(a)

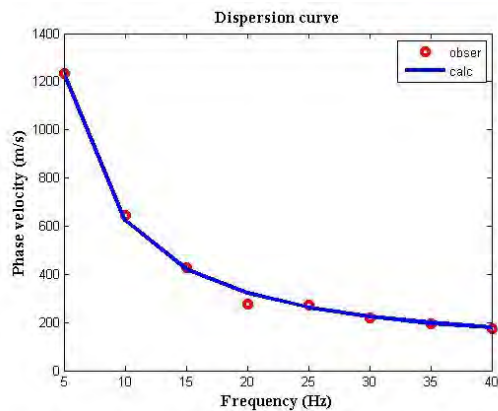


(b)

Gambar 4.10 Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan: (a) metode L-M (b) metode SVD



(a)



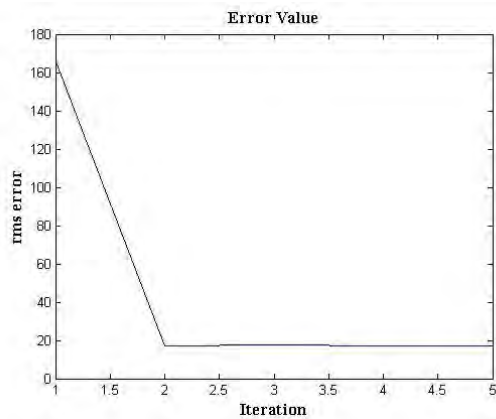
(b)

Gambar 4.11 Pencocokkan kurva dispersi gelombang Rayleigh “observasi” dan perhitungan sebagai fungsi frekuensi dengan *noise*: (a) metode L-M (b) metode SVD

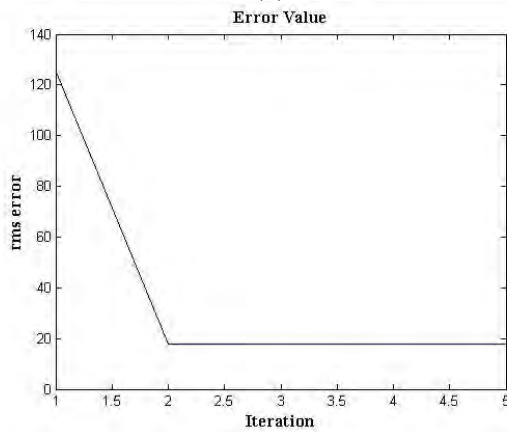
Pada Gambar 4.11 di atas, dapat dilihat bahwa sebaran data sintetik hasil inversi tidak terlalu jauh dari data sintetik pengukuran. Hasil ini dapat digunakan sebagai pembandingan untuk kurva dispersi yang tidak ditambah *noise*. Perbedaan yang sangat kecil ini dapat dijadikan sebagai acuan bahwa metode L-M dan SVD ini *robust* terhadap *noise*. Hal ini sesuai dengan hasil kurva dispersi yang didapatkan pada tahap sebelumnya dengan frekuensi 10-100 Hz.

Dari kedua metode, dapat dilihat *error rms* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Untuk metode L-M, nilai *error* yang didapatkan adalah 22.08798 m/s. Metode ini konvergen pada iterasi kelima dengan dua kali *running*. Sedangkan untuk metode SVD nilai *error*-nya adalah 17.77694 m/s yang konvergen pada iterasi kelima dengan satu kali *running*.

Gambar 4.13 menunjukkan hasil inversi kurva dispersi yang menggambarkan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman. Pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa sebaran data kecepatan gelombang geser tanpa tambahan *noise* yang dihasilkan mempunyai perbedaan yang kecil terhadap data kecepatan gelombang geser yang telah ditambah dengan *noise* 10%. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan gelombang geser hasil inversi tidak terlalu menyimpang dari kecepatan gelombang geser pengukuran. Sehingga, *noise* yang ditambahkan tidak berpengaruh terlalu besar terhadap hasil inversi. Kecepatan gelombang geser yang dihasilkan pada kedalaman yang dangkal mempunyai nilai yang lebih kecil daripada kecepatan gelombang geser yang terdapat pada lapisan yang semakin dalam.

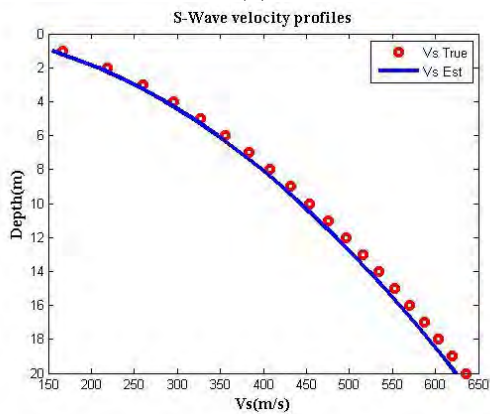
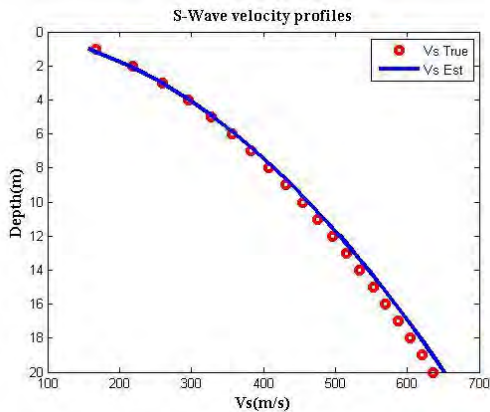


(a)



(b)

Gambar 4.12 Perbandingan *RMS error* sebagai fungsi iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD



Gambar 4.13 Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman yang sebenarnya dan hasil estimasi menggunakan (a) metode L-M (b) metode SVD

Berdasarkan pengujian kurva dispersi yang menggunakan frekuensi 10-100 Hz dan 5-40 Hz, dapat diketahui perbandingan

hasil inversi kurva dispersi sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Perbandingan nilai rms *error* kurva dispersi gelombang Rayleigh

Metode	$f=10-100$ Hz		$f=5-40$ Hz	
	Tanpa <i>Noise</i> (m/s)	Ditambah <i>Noise</i> (m/s)	Tanpa <i>Noise</i> (m/s)	Ditambah <i>Noise</i> (m/s)
Metode L-M	0.000457	18.963720	0.000117	17.047321
Metode SVD	11.320989	20.840296	7.810383	17.776943

Tabel 4.2 Perbandingan nilai rms *error* gelombang geser (V_s) sebagai fungsi kedalaman

Metode	$f=10-100$ Hz		$f=5-40$ Hz	
	Tanpa <i>Noise</i> (m/s)	Ditambah <i>Noise</i> (m/s)	Tanpa <i>Noise</i> (m/s)	Ditambah <i>Noise</i> (m/s)
Metode L-M	0.014	0.840	2.875	2.191
Metode SVD	1.705	2.168	1.466	1.834

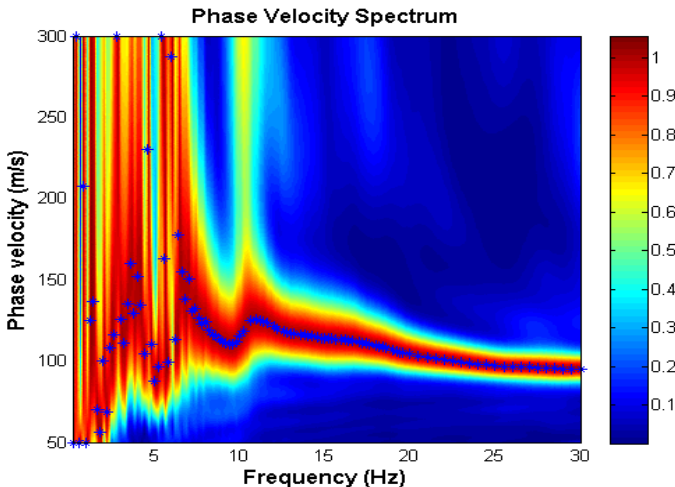
Dari perbandingan hasil pengujian data sintetik yang menggunakan jumlah frekuensi banyak dan sedikit, dapat diketahui bahwa pengujian data sintetik dengan jumlah frekuensi yang lebih sedikit mempunyai nilai *error* yang lebih rendah, baik itu yang tidak ditambah *noise* maupun yang telah ditambah *noise*. Jumlah data kecepatan gelombang geser yang dihasilkan sama banyak karena jumlah kedalaman yang digunakan sama, yaitu 20.

Pada metode L-M, rms *error* yang muncul pada proses inversi yang menggunakan jumlah frekuensi sedikit mempunyai

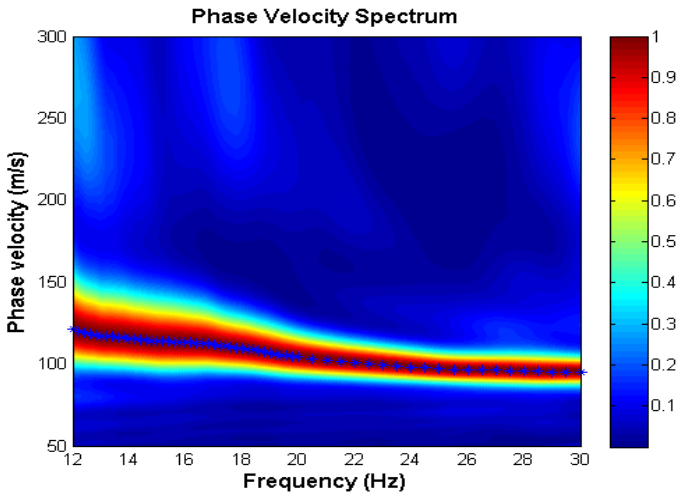
nilai yang lebih besar daripada *rms error* yang muncul pada penggunaan jumlah frekuensi yang lebih banyak. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh nilai *Lagrange Multiplier* yang digunakan. Nilai *Lagrange Multiplier* yang digunakan pada proses inversi ini semua sama, baik yang menggunakan frekuensi banyak maupun yang menggunakan frekuensi sedikit. Sehingga, diperlukan penggantian nilai *Lagrange Multiplier* yang lebih kecil untuk mendapatkan nilai *error* yang lebih rendah ketika iterasi maksimum tercapai.

4.3 Pengujian Kurva Dispersi untuk Data Lapangan

Metode L-M dan SVD yang telah diuji pada data sintetik lalu diaplikasikan pada data lapangan. Akuisisi pada data lapangan merupakan seismik aktif yang didapatkan dari pengukuran MASW yang diukur di tanggul Lumpur Sidoarjo (LUSI) dengan spasi *geophone* sebesar 2 meter dan jarak antara sumber getaran dan *geophone* pertama adalah 3 meter.



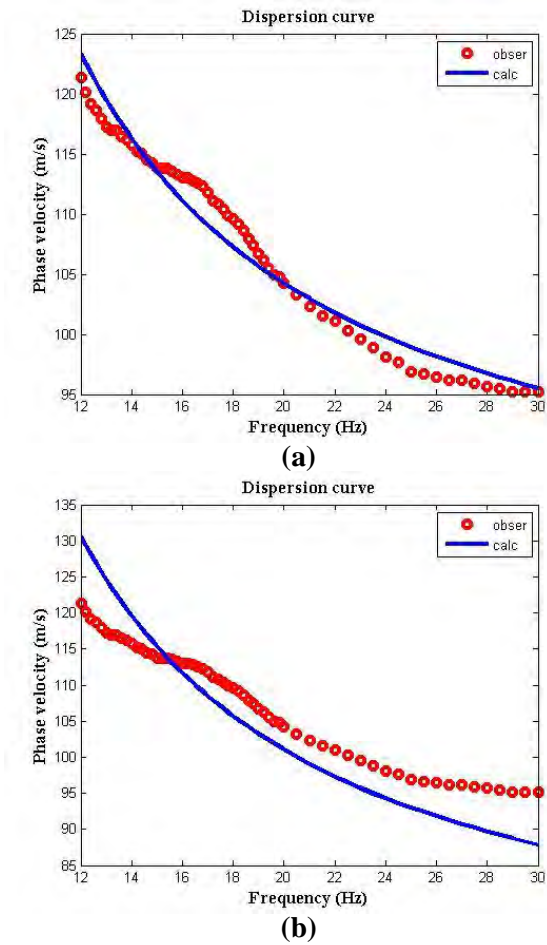
Gambar 4. 14 Data gelombang Rayleigh hasil analisis data MASW



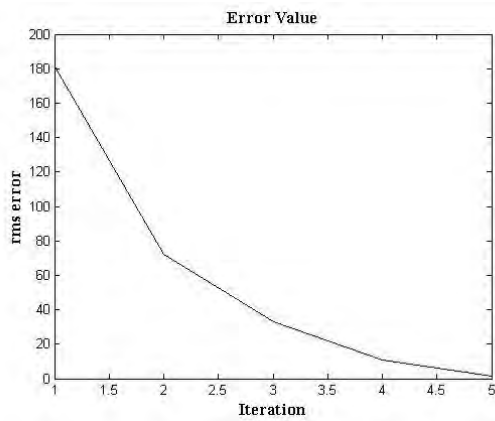
Gambar 4. 15 Data gelombang Rayleigh hasil *picking* analisis data MASW

Gambar 4.14 merupakan hasil analisis data MASW untuk mengidentifikasi kurva dispersi gelombang Rayleigh. Proses selanjutnya adalah kurva dispersi tersebut dipilih (*picking*) secara otomatis (Gambar 4.15) dan diinversikan menggunakan metode L-M dan SVD. Parameter-parameter yang digunakan pada proses ini sama dengan yang digunakan pada data sintetik.

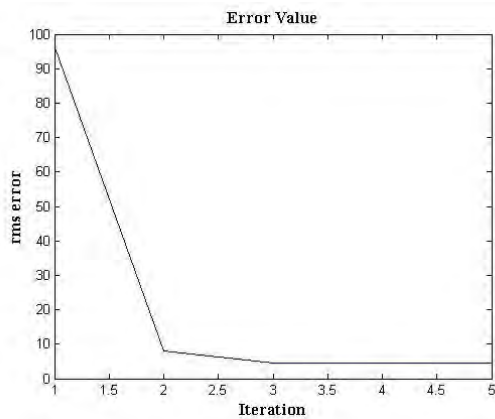
Gambar 4.16 menunjukkan hasil persebaran data kecepatan gelombang Rayleigh hasil inversi sebagai fungsi frekuensi terhadap data observasi. Pada kurva tersebut, dapat diketahui bahwa karakteristik bawah permukaan (bulatan merah) tidak berhimpit dengan data hasil inversi. Hal ini disebabkan oleh adanya lapisan yang berbeda pada data observasi lapangan, sehingga hasil inversi yang didapatkan tidak terlalu *fitting* terhadap data observasi.



Gambar 4.16 Perbandingan data observasi dan inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh sebagai fungsi frekuensi pada data lapangan: (a) metode L-M (b) metode SVD

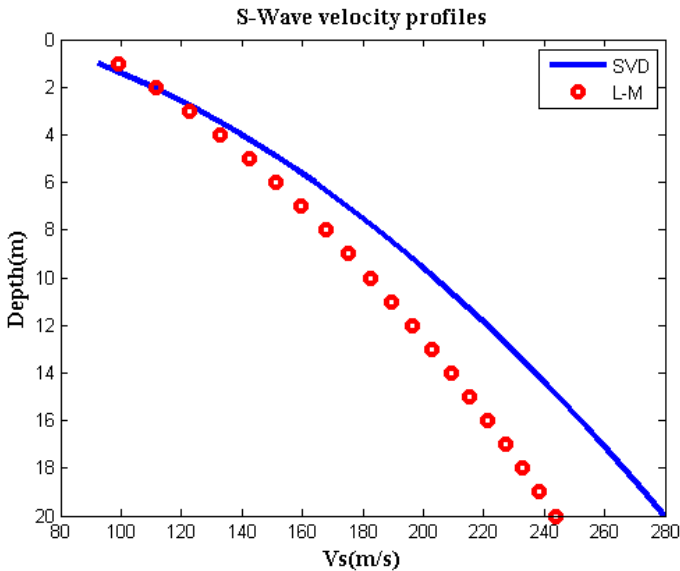


(a)



(b)

Gambar 4.17 Perbandingan *RMS error* sebagai fungsi iterasi: (a) metode L-M (b) metode SVD



Gambar 4. 18 Perbandingan profil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman kedua metode

Gambar 4.17 menunjukkan *rms error* terhadap iterasi. Hasil inversi dari kedua metode tersebut konvergen pada iterasi maksimum, yaitu iterasi kelima. Nilai *error* yang didapatkan pada metode L-M dan SVD adalah 1.82×10^{-7} m/s dan 4.31 m/s.

Selain itu, dari inversi kurva dispersi gelombang Rayleigh didapatkan hasil kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman sebagaimana Gambar 4.18. Hasil inversi menunjukkan bahwa kecepatan gelombang gesernya bersifat linier terhadap kedalaman. Semakin dalam lapisan tanah, semakin besar pula kecepatan gelombang gesernya. Solusi yang dihasilkan pada pemodelan kasus ini merupakan permasalahan inversi *over-determined* karena jumlah data yang digunakan pada kurva dispersi lebih banyak daripada jumlah parameter yang digunakan.

Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh Xia (2004), dijelaskan bahwa *Gibson Half-space* dapat digunakan untuk memodelkan struktur bawah permukaan pada suatu lapisan bumi tak berlapis. Hasil inversi pada *Gibson Half-space* menunjukkan kemungkinan profil kecepatan gelombang geser yang kontinu pada lapisan sedimen yang tidak terkonsolidasi. Hal ini sesuai dengan keadaan geologi LUSI. LUSI merupakan daerah dataran tinggi dimana keadaan geologi dangkalnya didominasi oleh sedimen aluvial yang tebal, yang meliputi delta sedimen dari sistem sedimen *back-arc*. Batuan sedimen pada daerah ini berupa tanggul, lempung lanauan, pasir lanauan, dan lempung. Batuan ini termasuk batuan sedimen yang terdapat pada masa *Early Miocene*. Daerah ini juga masih mengalami proses pergerakan tektonik lempeng yang sangat aktif. Sehingga, profil kecepatan gelombang geser pada daerah ini semakin ke dalam semakin besar. Hal ini sesuai dengan profil kecepatan yang didapatkan dari proses inversi kurva dispersi yang dilakukan dan *Standard Penetration Test* (SPT) daerah tersebut yang rendah, sekitar di bawah 15 pada kedalaman 30 meter karena LUSI merupakan daerah geologi dangkal. Hasil analisis kecepatan gelombang geser tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk mengamati kondisi kerentanan tanah yang berada di daerah sekitar tanggul LUSI.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan kajian teori, analisis data dan pembahasan yang telah dideskripsikan, didapatkan kesimpulan bahwa metode optimasi *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD) dapat menghasilkan inversi kurva dispersi yang cepat, sederhana, dan cukup baik dengan nilai *rms error* yang kecil.

5.2 Saran

Dengan selesainya penelitian ini, didapatkan beberapa hal yang dipertimbangkan untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya. Misalnya, diperlukannya pembandingan antara tingkat keakuratan dan kecepatan metode optimasi *Levenberg-Marquardt* (L-M) dan *Singular Value Decomposition* (SVD) dengan metode optimasi global (misalnya: *Simulated Annealing*, *Particle Swarm Optimization*, *Differential Evolution*, dan lain-lain), sehingga dapat diketahui tingkat kestabilan dari metode-metode optimasi yang digunakan sebagai pembandingan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR PUSTAKA

- Foti, S., Lai, C.G., Rix, G.J., dan Strobbia, C. 2015. *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. New York: CRS Press: A Spon Press Book.
- Gibson, R.E. 1967. *Some Results Concerning Displacements and Stresses in A Nonhomogeneous Elastic Half-Space*. *Geotechnique* 17(1), 58-67.
- Golub, G.H. dan Reinsch, C. 1967. *Singular Value Decomposition and Least Squares Solution*. *Numerical Mathematic* 14, 403-420.
- Hartantyo, E., Afif, R., dan Wiwit, S. 2009. *Active Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Survey for Sutet Tower Base Soil Compaction Presented at International Conference of Mathematics and Natural Sciences 2008*. ITB Bandung.
- Lai, C.G. 1998. *Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near Surface Site Characterization*. Atlanta: PhD Dissertation, Georgia Institution of Teehn.
- Lowrie, William. 2007. *Fundamentals of Geophysics, 2nd Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Marquardt, D.W. 1963. *An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters*. *Journal Social Industry Applied Mathematics* 2, 431-441.
- Miller, R.D dan Xia, J. 1999. *Using MASW to Map Bedrock in Olathe, Kansas, Kansas Geological Survey Open File Report No. 99-9*. Missouri: Final Report to Harding Lawson Associates, Lee's Summit.
- Miller, R.D., Xia, J., dan Park, C.B. 1999. *MASW to Investigate Sunsidence in the Tampa, Florida Area. Kansas Geological Survey Open File Report No. 99-33*. Kansas: Report to ELM Consulting LLC, Olathe, Kansas.

- Park, C.B., Miller, R.D., dan Xia, J. 1999. *Multichannel Analysis of Surface Waves, Geophysics, Vol. 64, No. 3 (May-June, 1999)*; Page 800-808.
- Park, C.B. dan Miller, R.D. 2004. *MASW to Map Shear-Wave Velocity of Soil, Kansas Geological Survey Open File Report 2004-30*. Kansas: The University of Kansas.
- Park, C.B. dan Miller, R.D. 2005. *Seismic Characterization of Wind Turbine Sites in Kansas by the MASW Method, Kansas Geological Survey Open File Report 2005-23*. Kansas: Report to Barr Engineering Company, Minneapolis.
- Santosa, Bagus Jaya. 2002. *Seismologi: Modul Ajar*. Surabaya: Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Santoso, Djoko. 2002. *Seismologi Eksplorasi*. Bandung: Departemen Teknik Geofisika ITB.
- Sholihan, Ahmad. 2010. *Analisis Dispersi Gelombang Rayleigh Struktur Geologi Bawah Permukaan Studi Kasus: Daerah Pasir Putih Dalegan Gresik*. Surabaya: Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Strang, G. 1993. *Introduction to Linear Algebra*. Wellesley: Cambridge Press.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., dan Sherrif, R.E. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vardoulakis, I. dan Verttos, C. 1988. *Dispersion Law of Rayleigh-type Waves in A Compressible Gibson Half-Space*. International Journal Numerical Analysis Method. Geomechanic 12, 639-655.
- Waskito, R.G.N. 2013. *Aplikasi Metode Inversi Kurva Dispersi Gelombang Rayleigh yang Robust Terhadap Noise Berbasis Differential Evolution*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Xia, J., Xu, Y., Miller, R.D., dan Chen, C. 2006. *Estimation of Elastic Moduli in A Compressible Gibson Half-space by Inverting Rayleigh-Wave Phase Velocity*. Kansas

- Geological Survey. Published by Springer 2006: Surveys in Geophysics 27, 1-17.
- Xia, J. 2006. *Delineating Subsurface Features with the MASW Method at Maxwell AFB in Montgomery, Alabama, Kansas Geological Survey Open File Report 2006-1*. Kansas: Report to Andrew Weinberg, Bechtel-S Corp., Texas.
- Yeluru, P.M. 2013. *Enhancing Usability of the Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Technique for Subsurface Physical Property Mapping by Incorporating Random-Array Seismic Acquisition*. Knoxville: University of Tennessee.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan pada tanggal 25 April 1991 di Mojokerto sebagai anak pertama dari delapan bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai dari MI Setia Bhakti Tamiajeng, MTs Al-Multazam Mojokerto, SMA Al-Multazam Mojokerto dan dilanjutkan pada jenjang sarjana di jurusan Fisika FMIPA-ITS dengan bidang minat

Fisika Bumi (Geofisika). Selama kuliah, penulis juga aktif di beberapa kegiatan kampus, baik di dalam maupun diluar kampus. Pada tahun pertama penulis mulai aktif di Tim ITS Bangun Desa sebagai staf divisi Engineering 2012-2013 dan sekretaris 2013-2014. Pada tahun kedua penulis aktif sebagai staf departemen Kesma HIMASIKA ITS dan sebagai *volunteer & member* di *Society of Petroleum Engineers (SPE) ITS SC*. Pada tahun ketiga dan keempat penulis aktif sebagai Sekretaris di *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) ITS SC* dan *Staff of External Division* di *Society of Exploration Geophysicists (SEG) ITS SC*. Selain itu, beberapa pelatihan keterampilan dan seminar telah diikuti, baik nasional maupun internasional. Prestasi yang pernah dicapai penulis selama kuliah di antaranya adalah *Student Volunteer at The 38th Indonesian Petroleum Association (IPA) Convention and Exhibition 2014* di Jakarta, PKM Didanai dikti tahun 2013 dan 2014, peserta *1st HAGI Student Competition 2014* di Solo, dan menjadi *speaker* di beberapa *student paper contest* tahun 2014 dan 2015. Semasa kuliah penulis juga mendapatkan beasiswa, yaitu Beasiswa BBP, Beasiswa PPA, dan Beasiswa Alumni Geofisika ITS. Penulis berterima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan selama kuliah. Penulis sangat senang jika dapat berdiskusi mengenai tugas akhir ini dan dapat dihubungi melalui email: rohmatul.aminah@gmail.com.